자동차 전력변환모듈용 Aluminum Wire의 초음파 접합특성

박지연* · 오철민* · 원덕희** · 홍원식*,†

*전자부품연구원 융복합전자소재연구센터

** (주)아이에이파워트론

Ultrasonic Bonding Property of Aluminum Wire for Power Conversion Module of Automotive

Ji-Yeon Park*, Chulmin Oh*, Deok-Hee Won**, and Won Sik Hong*,†

*Electronic Convergence Materials & Device Research Center, Korea Electronics Technology Institute,
Gyeonggi-do, 13509, Korea

**R&D Division, iA PowerTron Inc, Incheon, 21314, Korea

†Corresponding author : wshong@keti.re.kr

(Received May 24, 2018 ; Revised May 31, 2018 ; Accepted June 4, 2018)

Abstract

This study verified ultrasonic bonding reliability of 15 mil and 6 mil aluminum wires for power conversion module of automotive. Aluminum wires were bonded on aluminum metalized Si chip using by ultrasonic bonding process. To confirm their joints reliability, high temperature and high humidity test (TH) and thermal shock test (TS) were conducted. TH was tested at 85 ± 3 °C, 85% RH for 1,000 h. TS condition was -40~125 °C, 10 min dwell time at each temperature for 1,000 cycles. Before and after the tests, wire ball shear strength and wire ball pull strength of each wires were measured and compared to the degradation rate of bonding strength. Based on these results, bonding strength degradation rate of TS was 10 times faster than that of TH, and TS was more effective test method than TH. Ultrasonic bonding layer crack was generated at the interfaces between Al wire and Al metalization layer of Si chip surface, and propagated along the interfaces.

Key Words : Power module, Al wire, Ultrasonic bonding, Bonding strength, Interface, failure

1. 서 론

자동차는 RoHS, ELV 등의 환경규제가 강화되고 있으며, 친환경 제품에 대한 요구가 증가하고, 스마트카 방향으로 발전되고 있다¹⁻³⁾. 따라서 자동차의 전자장비화 되는 속도는 매우 빠르게 변화되고 있으며, 이중 전기자동차와 같은 화석연료를 사용하지 않는 친환경 차량의 전력공급 및 변환을 위한 다양한 형태의 전력변환모듈이 적용되고 있다. 이러한 전력변환모듈의 에너지 변환 효율과 장기간 사용 가능한 고내구 신뢰성에 대한 요구가 증가하고 있다. 또한 자동차의 안전성은 사람의 생명과 직결되기 때문에, 일반 전자제품에서 요구되는 수준에 비해 매우 엄격한 수준에서 관리되고 있다. 전

원 공급 및 변환 핵심 부품인 전력변환모듈의 신뢰도는 자동차 전체의 안전성 및 내구성에 많은 영향을 준다⁴⁾.

전력변환모듈은 실리콘 칩 (Si chip), direct bonded copper (DBC), 베이스 플레이트 (base plate), 커패시터 (capacitor), 저항기 (resistor), 터미널 (terminal) 등으로 구성되었으며, 각 부품은 솔더 (solder) 또는 와이어 (wire)를 이용하여 전기적으로 연결되어있다. 자동차에 사용되는 전자제품은 일반 전자제품과 달리 열적·기계적으로 가혹한 사용 환경에 노출 된다⁵⁻¹⁰⁾. 실내 전자제품의 경우 -40~85 °C, 엔진룸용 전자제품의 경우 -40~125 °C 온도범위에 노출된다. 최근 전력변환모듈은 고효율·고신뢰성에 대한 요구 증가로 SiC 소자를 적용한 모듈 개발이 급격히 진행되고 있으며, SiC 소자 적용에 따라 모듈의 동작온도는 더 증가될 전망이다. 이

에 따라 전력변환모듈에 사용된 다양한 재료의 열팽창 계수 (coefficient of thermal expansion, CTE) 차이에 의해 솔더 접합부 또는 와이어 접합부에는 응력 (stress) 집중으로 인한 피로파괴가 발생될 수 있다¹¹⁾.

와이어는 초음파 접합조건, 와이어 두께, 와이어 재질 그리고 접합부 재질에 따라 와이어 접합특성 및 열화특성이 다르게 나타난다¹²⁻¹⁵⁾. 와이어 접합특성을 평가하는 방법은 와이어 접합부 모양과 접합면적을 측정하는 비파괴시험, 와이어 전단강도시험 (wire ball shear test, BST), 와이어 인장강도시험 (wire ball pull test, BPT), 단면분석과 같은 파괴시험이 있다¹⁶⁾. 전력변환모듈이 집적화, 소형화됨에 따라 모듈 제조에 사용되는 와이어 두께도 더욱 미세화 되고 있다. 따라서 일반적으로 사용되고 있는 알루미늄 (aluminum, Al) 와이어의 초음파 접합부에 대한 정량적 평가가 요구된다. 본 연구에서는 전장품의 실 사용환경과 유사한 조건 하에 전력변환모듈을 노출시킨 후, Al 와이어 두께에 따른 와이어의 초음파 (ultrasonic bonding) 접합부에 대한 접합내구성을 비교분석 하였다.

2. 실험 방법

2.1 무연솔더 적용 전력변환모듈 제작

Fig. 1은 무연솔더 (Pb-free solder)를 적용하여 개발된 전력변환모듈의 외관 사진이다. 실험에 사용된 전력변환모듈은 Fig. 2와 같이 Si chip, DBC 및 base plate는 Sn-3.0Ag-0.5Cu (SAC305) 무연솔더를 사용하여 진공 솔더링 (vacuum soldering) 공정으로 접합되었으며, 시그널 핀 (signal pin)과 DBC는 Al wire를 초음파 본딩으로 접합되었다. Al 와이어가 접합될 Si chip의 윗면은 알루미늄 (aluminum, Al) 표면처리가 되었으며, 뒷면은 니켈 (Ni) 표면처리 되어 있었다. 또한 사용된 DBC는 alumina 재질의 세라믹 기판

Fig. 1 Photograph of power conversion module for automotive

Fig. 2 (a) SEM micrograph and (b) schematic drawing of cross-sectioned power conversion module

양면에 Cu 층이 존재하며, 그 위에 chip 또는 와이어 등의 접합을 위해 DBC 표면은 무전해 니켈 (electronicless nickel) 표면처리된 것을 사용 하였다. Si chip과 DBC에 초음파 접합에 사용된 Al 와이어는 (Heraeus社, Al-R) 각각 $381.0 \mu\text{m}$ (15 mil) 과 $152.4 \mu\text{m}$ (6 mil) 와이어를 사용하였다. 15 mil 와이어의 초음파 접합공정은 초음파 본딩장비를 (Ultrasonic Engineering Co., REBO-9) 사용하여 접합하였다. 15 mil Al 와이어의 초음파 접합공정 조건으로 Si chip에는 750~850 gf 하중을 인가하며 190~210 mA 출력조건에서 140~160 ms 동안 초음파를 인가하였고, DBC 표면의 와이어 본딩에는 800~900 gf 하중으로 140~160 ms 조건으로 초음파 접합을 실시하였다. 6 mil Al 와이어의 초음파 본딩 조건은 K&S社 (ASTERION) 본딩장비를 사용하였으며, Si chip 접합부에는 170~190 gf, 35~45 ms 조건으로, DBC 접합부에는 170~190 gf, 26~30 mA, 60~80 ms 조건으로 초음파 접합하였다.

2.2 와이어 접합부 내구 환경시험 조건

Al 와이어의 초음파 접합부에 대한 내구특성을 비교 분석하기 위해 고온고습시험 (temperature-humidity test, TH)과 열충격시험 (thermal shock test, TS)을 진행하였다. 각각의 시험을 통해 시험시간에 따른 Al 와이어의 접합부에 대한 열화특성을 분석하였다. 고온고습시험은 ESPEC社 (LH-113) 장비를 사용하였으며, $85 \pm 3^\circ\text{C}$, $85 \pm 3\%$ RH 조건에서 1,000 h 동안 진행하였다. 열충격시험은 ESPEC社 (TSE-11A) 장비를 사용하였으며, 시험 조건은 Fig. 3과 같이 $-40 \sim 125^\circ\text{C}$ 온도조건에서 각각 10분간 유지하였으며, 온도변화 시간은 3 min 이내로 하여 1,000 cycles까지 진행하였다.

Fig. 3 Temperature profile for thermal shock test

2.3 와이어 접합강도 측정조건

환경시험 전후 와이어의 접합강도 측정을 위해 Fig. 4와 같이 BST와 BPT를 진행하였다. 와이어 접합강도 측정은 Dage사의 분당시험기를 (Dage 4000) 사용하였다. 와이어의 접합강도와 인장강도 결과는 5개를 시험하여 산술평균한 값을 대푯값으로 산출하였다. BST와 BPT 시험조건은 Fig. 4와 같이 측정속도 $167 \mu\text{m/s}$ 로 시험하였다. BST 시험은 Fig. 4(b)와 같이 시험 높이는 $40 \mu\text{m}$ 이며, 측정거리는 와이어 두께 보다 $50 \mu\text{m}$ 를 추가하여 측정하였다. BPT의 경우 Fig. 4(c)와 같이 45° 각도로 기울여 와이어 접합부의 인장강도를 측정하였다.

Fig. 4 Schematic diagram of (a,b) wire ball shear and (c) wire ball pull test

3. 실험 결과

3.1 환경시험 전후 와이어 외관 관찰

15 mil과 6 mil 와이어의 고온고습시험 및 열충격시험 전후 접합부에 대한 외관분석 결과는 다음 Fig. 5와 같다. Fig. 5(a-b) 초음파 접합 후 초기 와이어의 외관분석 사진이며, Fig. 5(c)와 같이 TS 및 TH 전후 와이어 및 와이어 접합부에서는 단선 (open) 및 균열

(c)	Initial	After TH 500	After TH 1000	After TS 500	After TS 1000
15 mil Al wire					
6 mil Al wire					

Fig. 5 Optical micrographs of as-bonded (a) 6 mil, (b) 15 mil aluminum wire and (c) wire bonding area with thermal shock cycles and temperature-humidity test time

(crack)은 관찰되지 않았다.

3.2 환경시험 전후 15 mil 와이어의 접합강도

15 mil Al 와이어의 TH 및 TS 시험시간에 따른 BST 결과는 다음 Fig. 6와 같다. 15 mil 와이어의 초기 전단강도 값은 평균 1,512 gf 이었고, TH 1,000 h 후 와이어 불 전단강도는 1,479 gf로 초기 대비 2.2% 감소되어 매우 작은 열화율을 나타내었다. 반면 TS 1,000 cycles 완료 후 와이어 불 전단강도 값은 1,176 gf로 초기 대비 약 22%가 감소된 것을 알 수 있었다. 이러한 결과로 볼 때, TS의 열화율이 TH에 비해 10배 더 가혹한 시험임을 알 수 있었고, 단시간 내에 와이어의 열화율을 평가하기 위해서는 TS의 변별력이 보다 우수한 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 15 mil Al 와이어의 TH 및 TS 시험시간에 따른 BPT 결과이다. 이 경우 초기 와이어의 인장강도는 717 gf로 측정 되었으며, TH 및 TS 후 BPT는 각각 737 gf 및 712 gf로 나타나 거의 열화가 나타나지 않았다. 열화가 나타나지 않았던 이유로는 와이어 자체를 당김으로써 인장강도를 측정하는 방법은 접합부의 접합강도 보다는 와이어 자체의 인장강도 특성이 측정되는 것으로 보인다. 따라서 TH나 TS 시험에 따라 Al 와이어 자체 인장강도 값의 변화가 작고, 와이어의 불 접합강도 보다는 와이어의 인장강도가 작아서 이러한 비슷한 값을 나타내는 것으로 사료된다. 따라서 이러한 결과로 볼 때, 초음파 접합된 와이어의 접합강도를 측정하는 경우, 와이어의 인장강도를 측정하는 것

Fig. 6 Wire ball shear strength variation of 15 mil diameter Al wire with thermal shock cycles and temperature-humidity test time

Fig. 7 Wire pull strength variation of 15 mil diameter Al wire with thermal shock cycles and temperature-humidity test time

보다 와이어 불 전단강도를 측정하는 것이 보다 정확한 열화특성을 비교할 수 있는 시험 방법으로 판단된다.

3.3 환경시험 전후 6 mil 와이어의 접합강도

TH 및 TS 시험시간에 따른 6 mil 와이어의 BST 및 BPT 결과는 다음 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. TH 1,000 h 후 와이어의 전단강도 초기 328 gf에서 366 gf로 다소 증가한 것으로 나타났으며, 이것은 시험 샘플의 오차범위에 따른 편차인 것으로 생각 된다 (Fig. 8). 반면 TS 1,000 cycles 완료 후 BST 값은 258 gf로

Fig. 8 Wire ball shear strength variation of 6 mil diameter Al wire with thermal shock cycles and temperature-humidity test time

Fig. 9 Wire pull strength variation of 6 mil diameter Al wire with thermal shock cycles and temperature-humidity test time

초기 와이어 볼 전단강도 값의 약 79 % 수준으로 21% 감소된 값을 나타내었다. 이러한 결과는 앞서 15 mil 실험 결과와도 유사한 경향을 나타내고 있다. 와이어 볼 접합부에 대한 전단강도를 비교할 때 고온고습 한 환경 보다 열충격 조건에서 발생하는 온도편차에 의한 접합부 열화가 더 많이 발생하는 것으로 사료된다.

Fig. 9는 6 mil 와이어에 대한 BPT 결과, 초기 227 gf에서 TH 1,000 h 후 201 gf로 감소되었고, TS 1,000 cycles 후에도 194 gf로 BPT 값이 감소된 것을 알 수 있었다. BPT에 대한 TH 및 TS 후 변화율을 비교해 보면, 각각 11 %와 15 % 로 나타나, TS 가 TH 보다 와이어의 접합강도 감소가 더 많이 나타난 것을 알 수 있었다. BPT의 경우, 와이어 6 mil 정도로 얇은 경우에는 와이어 자체의 인장강도 보다 와이어 접합부의 접합강도가 작아서 접합강도가 측정 가능한 것으로 보인다. 그러나 15 mil 정도로 두꺼운 와이어에서는 와이어 자체의 인장강도가 접합강도 보다 작아서 오히려 와이어의 접합강도 측정이 어려운 것으로 판단된다.

3.4 환경시험 전후 초음파 본딩 와이어 접합 계면 분석

TH 및 TS 후 와이어 접합부의 전단강도 및 인장강도 감소 원인을 분석하기 위하여 와이어의 단면분석을 진행하였다. Fig. 10은 TS 전 15 mil 와이어 접합부에 대한 단면 SEM 분석결과이다. Chip/DBC 솔더 접합부 및 Al 와이어 접합부 모두 양호한 접합 상태를 나

Fig. 10 Cross-sectional SEM micrographs of 15 mil aluminum wire before thermal shock test

Fig. 11 Cross-sectional SEM micrographs of 15 mil aluminum wire after (a,b,d) 500 and (c,e) 1,000 thermal shock cycles

타내고 있으며, 접합부에서 균열과 같은 결함은 관찰되지 않았다.

Fig. 11의 (a), (b) 그리고 (d)는 TS 500 cycles 후 단면 SEM 사진이며, 와이어 접합부 끝 부분에서 균열이 일부 발생된 것이 관찰되었다. Fig. 11의 (c)와 (e)는 TS 1,000 cycles 후 단면 SEM 사진으로, 와이어의 초음파 접합부 전체에서 균열이 전파된 것이 관찰되었다. TS 시험 시간이 경과함에 따라 초음파 접합부의 균열발생이 와이어의 전단강도 감소 원인에 기인한 것으로 판단된다.

Fig. 12는 TS 1,000 cycles 완료 후 15 mil 와이어 접합부 단면 SEM 사진이며, Fig. 12의 (b)는 (a)의 접합부 균열 발생부분에 대한 확대 사진이다. Fig. 12(b)의 단면사진을 보면, 접합부 균열은 Al 와이어와 Si chip의 Al metalization 계면 사이에서 발생한 것을 확인할 수 있다. Si Chip과 Al metalization의 adhesion은 양호한 것으로 판단되며, Al metalization과 Al 와이어의 초음파 접합부에서 균열이 발생되고 전파된 것으로 보아, 초음파 접합부의 열화로 인해 균열이 접합

Fig. 12 Cross-sectional SEM micrographs of 15 mil aluminum wire after (a) 1,000 thermal shock cycles. (b) magnified view of A region in (a)

Fig. 13 Cross-sectional SEM micrographs of 15 mil aluminum wire after (a) 1,000 h temperature-humidity test. (b) magnified view of A region in (a), (c,d) magnified view of B and, (e) magnified view of C

계면을 따라 진전된 것으로 판단된다^{17,18)}.

Fig. 13은 TH 1,000 h 후 와이어 접합부 단면사진이다. Fig. 13(a)는 와이어 전체의 사진이며, Fig. 13의 (b-e)는 와이어 접합부 확대 사진이다. TH 1,000 h

Fig. 14 Cross-sectional SEM micrographs of 6 mil aluminum wire after (a) 1,000 h temperature-humidity test. (b) 1,000 thermal shock cycles. (c) magnified view of A region in (a) and (d) magnified view of B region in (b)

완료한 결과 균열은 Al 와이어와 Si chip의 Al metallization 계면 사이에서 발생하여 접합계면을 따라 내부로 전파되었으며, 와이어 접합 길이의 약 30 % 정도 진전된 것으로 나타났다. 그러나 TH 후 전단강도 값에 크게 변화가 없었던 것으로 보아, 와이어 접합부 전체 길이의 약 30 % 균열은 와이어의 전단강도 값에 크게 영향을 주지 않는 것으로 분석된다.

Fig. 14는 6 mil 와이어의 환경시험 완료 후 단면분석 SEM 사진이다. Fig. 14(a)는 TH 1,000 h 후 와이어 초음파 접합부 단면 사진이며, Fig. 14(b)는 TS 1,000 cycles 후 단면 사진이다. Fig. 14의 (c,d)는 Fig. 14(a,b)의 A와 B 영역을 확대한 사진이다. 6 mil 와이어는 TH 및 TS 후 Al 와이어와 Si chip의 Al metallization된 계면에서 균열이 시작되어 와이어 전체 길이의 약 25% 까지 전파된 것을 확인하였다. 6 mil 와이어의 경우에는 TH와 TS 후 접합부에 대한 균열 전파속도가 비슷한 것으로 나타났다. 15 mil 와이어에서는 TH 시험 후 BST 값의 변화가 거의 없었으나, 6 mil 와이어의 경우에는 초기 대비 약 11% 감소된 BPT 값을 나타내었다. 이러한 결과로 볼 때, 와이어의 두께가 얇은 6 mil 와이어의 경우 초기 접합된 상태가 와이어의 접합내구성에 미치는 영향도가 더 큰 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 전력변환모듈에 사용되는 Al

와이어에 대한 초음파 접합부의 내구환경에 따른 접합 특성을 비교분석 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 15 mil 와이어의 경우, TH 1,000 h 후 BST는 초기 대비 2.2%, TS 1,000 cycles 완료 후에는 약 22%가 감소되었다. 이러한 결과로 볼 때, TS의 열화율이 TH에 비해 10배 더 가혹한 시험임을 알 수 있었고, 단시간 내에 와이어의 열화율을 평가하기 위해서는 TS의 변별력이 TH 보다 우수한 것을 알 수 있었다. 이러한 이유는 와이어 볼 접합부에 대한 전단강도를 비교할 때 고온고습한 환경 보다 열충격 조건에서 발생하는 온도편차에 의한 접합부 열화가 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

2) 와이어 직경이 6 mil 정도로 얇은 경우, 와이어 자체의 인장강도 보다 와이어 접합부의 접합강도가 작아 초음파 본딩부에 대한 접합강도 측정이 가능하였다. 그러나 15 mil 정도로 직경이 두꺼운 경우, 와이어 자체의 인장강도가 접합강도 보다 작아서 오히려 와이어의 접합강도 측정이 어려운 것으로 판단된다. 따라서 와이어의 직경이 큰 경우에는 BST 방법이 BPT 보다 더 정확한 시험방법임을 알 수 있었다.

3) Al 와이어의 초음파 접합부에 발생된 균열은 Al 와이어와 Si chip의 Al metalization 계면 에서 발생 되고 접합계면을 따라 전파된 것으로 보아, 접합부 열화로 인해 균열이 진전된 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 청정생산기반전문기술개발 사업(과제번호: 10051318)의 지원을 받아 수행된 연구결과입니다.

ORCID: Ji-Yeon Park: <https://orcid.org/0000-0003-0648-8791>

ORCID: Won Sik Hong: <https://orcid.org/0000-0001-8398-177X>

References

- European Union Council, Directive 2011/65/EU of the European Parliament and of the Council, Restriction of the use of Certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment (RoHS), (2011)
- European Union Council, Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on end-of life vehicle (ELV), (2016)
- Sonja Haustein and Anders Fjendbo Jensen, Factors of electric vehicle adoption, A comparison of conventional and electric car users based on a extended theory of planned behavior, *International Journal of Sustainable Transportation*, (2018), 1-13
<https://doi.org/10.1080/15568318.2017.1398790>
- Andrew J.G. Strandjord, Scott Popelar and Christine Jauernig, Interconnecting to aluminum- and copper-based semiconductors (electroless-nickel/gold for solder bumping and wire bonding), *Microelectronics Reliability*, 42(2) (2002), 265-283
[https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(01\)00236-0](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(01)00236-0)
- Yong-Ho Ko, Sehoon Yoo and Chang-Woo Lee, Evaluation on Reliability of High Temperature Leadfree Solder for Automotive Electronics, *Journal of Microelectronics & Packaging Society*, 17(4) (2010), 35-40
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.26>
- Tuan-Yu Hung, Li-Ling Liao, C.C. Wang, W.H. Chi, and Kuo-Ning Chiang, Life Prediction of High-Cycle Fatigue in Aluminum Bonding Wires Under Power Cycling Test, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, 14(1) (2014), 484-492
<https://doi.org/10.1109/TDMR.2013.2288703>
- Won Sik Hong and Chul Min Oh, Degradation Behavior of Solder Joint and Implementation Technology for Lead-free Automotive Electronics, *Journal of KWJS*, 31(3) (2013), 22-30
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2013.31.3.22>
- Jun-Hwan Bang, Dong-Yurl Yu, Young-Ho Ko, Jeong-Won Yoon, Chang-Woo Lee, Lead-free Solder for Automotive Electronics and Reliability Evaluation of Solder Joint, *Journal of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 26-34
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.26>
- Hua Ye, Minghui Lin, Cemal Basaran, Failure modes and FEM analysis of power electronic packaging, *Finite Elements in Analysis and Design*, 38 (2002), 601-612
[https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(01\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(01)00094-4)
- Y.Yamada, Y. Takaku, Y. Yagi, I. Nakagawa, T. Atsumi, M. Shirai, I. Ohnuma and K.Ishida, Reliability of wire-bonding and solder joint for high temperature operation of power semiconductor device, *Microelectronics Reliability*, 47(12) (2007), 2147-2151
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2007.07.102>
- Kristian Bonderup Pedersen, Peter Kjaer Kristensen, Vladimir Popok, and Kjeld Pedersen, Micro-sectioning approach for quality and reliability assessment of wire bonding interfaces in IGBT modules, *Microelectronics Reliability*, 53(9-11) (2013), 1422-1426
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2013.07.010>
- Luke England and Tom Jiang, Reliability of Cu Wire Bonding to Al Metallization, *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 57 (2007), 1604-1613
<https://doi.org/10.1109/ECTC.2007.374009>
- S. Murali, N. Srikanth, Charles J. Vath III, Effect of wire size on the formation of intermetallics and Kirkendall voids on thermal aging of thermosonic wire bonds, *Material Letters*, 58 (2004), 3096-3101
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2004.05.070>
- Ivy Qin, Hui Xu, Horst Clauberg, Ray Cathcart, Viola L. Acoff, Bob Chylak and Cuong Huynh, Wire Bonding of Cu and Pd Coated Cu Wire, Bondability, Reliability, and IMC Formaiton, *IEEE Electronic Components and Technology Conference*, 61 (2011), 1489-1495
<https://doi.org/10.1109/ECTC.2011.5898707>
- D.S. Liu, Y.C. Chao and C.H. Wang, Study of wire bond-

- ing looping formation in the electronic packaging process using the three-dimensional finite element method, *Finite Element in Analysis and Design*, 40 (2004), 263-286
[https://doi.org/10.1016/S0168-874X\(02\)00226-3](https://doi.org/10.1016/S0168-874X(02)00226-3)
16. Daniel T. Rooney, Deepak Nager, David Geiger, Dongkai Shangguan, Evaluation of wire bonding performance, process conditions, and metallurgical integrity of chip on board wire bonds, *Microelectronics Reliability*, 45(2) (2005), 379-390
<https://doi.org/10.1016/j.microrel.2004.06.008>
 17. S. Ramminger, P. Turkes, and G. Wachutka, Crack Mechanism in Wire Bonding Joints, *Microelectronics Reliability*, 38(6-8) (1998), 1301-1305
[https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(98\)00141-3](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(98)00141-3)
 18. S. Ramminger, N. Seliger, G. and Wachutka, Reliability Model for Al Wire Bonds subjected to Heel Crack Failures, *Microelectronics Reliability*, 40 (8-10) (2000), 1521-1525
[https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(00\)00139-6](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(00)00139-6)